

**Tomáš PETŘÍK<sup>1</sup>, Eva HRUBEŠOVÁ<sup>2</sup>, Martin STOLÁRIK<sup>3</sup>, Miroslav PINKA<sup>4</sup>**

**PARAMETRICKÁ STUDIE VLIVU TYPU ZEMINY NA AMPLITUDU RYCHLOSTI KMITÁNÍ**

**PARAMETRIC STUDY ON THE EFFECTS OF SOIL TO OSCILLATION VELOCITY**

**Abstrakt**

Příspěvek je zaměřen na možnost posouzení vlivu charakteru zemin na amplitudu rychlosti kmitání vyvolanou dynamickým zatížením. Pro řešení parametrické studie je využito matematického modelování ve výpočetním programu Plaxis 2D založeného na metodě konečných prvků. Dynamické zatížení vychází v příspěvku z experimentálního měření provedeného na standu v areálu Fakulty stavební, VŠB-TUO. Vlastnosti zemin vycházejí ze směrných normových charakteristik. Výsledkem provedené modelové analýzy jsou útlumové křivky amplitudy rychlosti kmitání pro jednotlivé typy zemin.

**Klíčová slova**

Dynamické zatížení, amplituda rychlosti kmitání, Plaxis, vlastnosti zemin.

**Abstract**

The paper focuses on the possibility of evaluating the influence of character of the soil to oscillations velocity induced dynamic loads. Mathematical modeling is used to solve the parametric study. Models are created in software Plaxis 2d based on finite element method. Dynamic load is based on experimental measurements on the stand in the area of the Faculty of Civil Engineering, VSB-TUO. Soil properties are determined from the normative indicative characteristics. The paper result is attenuation curve velocity of oscillation velocity for different types of soils.

**Keywords**

Dynamic load, oscillation velocity, Plaxis, properties of soils.

**1 ÚVOD**

Při realizaci staveb, včetně těch geotechnických, je snahou stavitelů různými způsoby předcházet vzniku poruch na konstrukcích a jejich šíření [2]. Tyto poruchy jsou především způsobeny nesprávnou technologií výstavby a založení a použitými materiály. V nemalé míře mohou být

---

<sup>1</sup> Ing. Tomáš Petřík, Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 321 362, e-mail: tomas.petrik@vsb.cz.

<sup>2</sup> Doc. RNDr. Eva Hruběšová, Ph.D., Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 321 373, e-mail: eva.hrubesova@vsb.cz.

<sup>3</sup> Ing. Martin Stolárik, Ph.D., Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 321 928, e-mail: martin.stolarik@vsb.cz.

<sup>4</sup> Ing. Miroslav Pinka, Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 321 928, e-mail: miroslav.pinka@vsb.cz.

způsobeny i seizmickým zatížením v důsledku přírodních [10] či antropogenních vlivů [8]. Mezi nejvýznamnější činnosti vyvolané člověkem, které způsobují seizmické vlnění, patří například trhací práce [9], beranění štětovic [4] či hutnění zeminy [6]. Předjetí nežádoucím účinkům, které mohou být způsobeny těmito činnostmi, můžeme pomoci správné volby technologie výstavby pro danou lokalitu. Jednou z možností jak přispět ke správné a spolehlivé volbě technologie výstavby je využití matematického modelování daného problému.

Na vlastní šíření seizmického vlnění má vliv spousta parametrů, které je nutno do modelů zahrnout. Jedním z těchto parametrů je i samotné prostředí, kterým se vlnění šíří. Cílem tohoto příspěvku je studie vlivu jednotlivých zemin na amplitudu rychlosti kmitání vyvolanou dynamickým zatížením v jednoduchém matematickém modelu. Jednotlivé typy zemin jsou do modelů zadány podle směrných normových charakteristik uvedených v normě ČSN 73 1001 (dále jen SNCH). Vyhodnocení a analýza výsledků matematických modelů může pomoci při předvídání šíření seizmického vlnění reálným prostředím. Díky tomu se dá přizpůsobit technologie výstavby.

## 2 CHARAKTERISTIKA MODELŮ

Pro matematické modelování je zvolena dvojdimenzionální varianta výpočetního programu Plaxis, která byla v rámci projektu „Tvorba a internacionalizace špičkových vědeckých týmů a zvyšování jejich excelence na Fakultě stavební VŠB-TUO“ (CZ.1.07/2.3.00/20.0013) up-gradovaná na novější verzi (Plaxis 2D, 2010). Matematické modely jsou z důvodu časové a datové úspory zjednodušeny (např. pouze jedna vrstva zeminy, nebo zanedbání vlivu podzemní vody). Modely jsou vytvořeny jako rotačně symetrické v rozsahu 100 x 50 m (délka x hloubka). Volba hutnicího stroje vycházela z výsledků experimentálního měření [7] na zkušebním standu v areálu FAST [1]. Celkem je zhotoveno 18 parametrických modelů podle typů zemin z SNCH.

### 2.1 Zvolený výpočetní program

Plaxis je výpočetní program určený pro dvojdimenzionální a trojdimenzionální deformační a stabilitní analýzu geotechnických úloh. Tento program je založen na numerické metodě konečných prvků a je produktem holandské společnosti PLAXIS BV. Pro analýzu dynamických úloh pomocí MKP disponuje tento výpočetní program výpočtovým dynamickým modulem. Samotný výpočetní program se vyznačuje jednoduchým vizuálním prostředím (viz. Obr. 1).

Dynamická analýza ve výpočetním programu Plaxis vychází z rovnice (1) Newtonova pohybového zákona [4].

$$F = m \cdot a_g \quad (1)$$

kde:

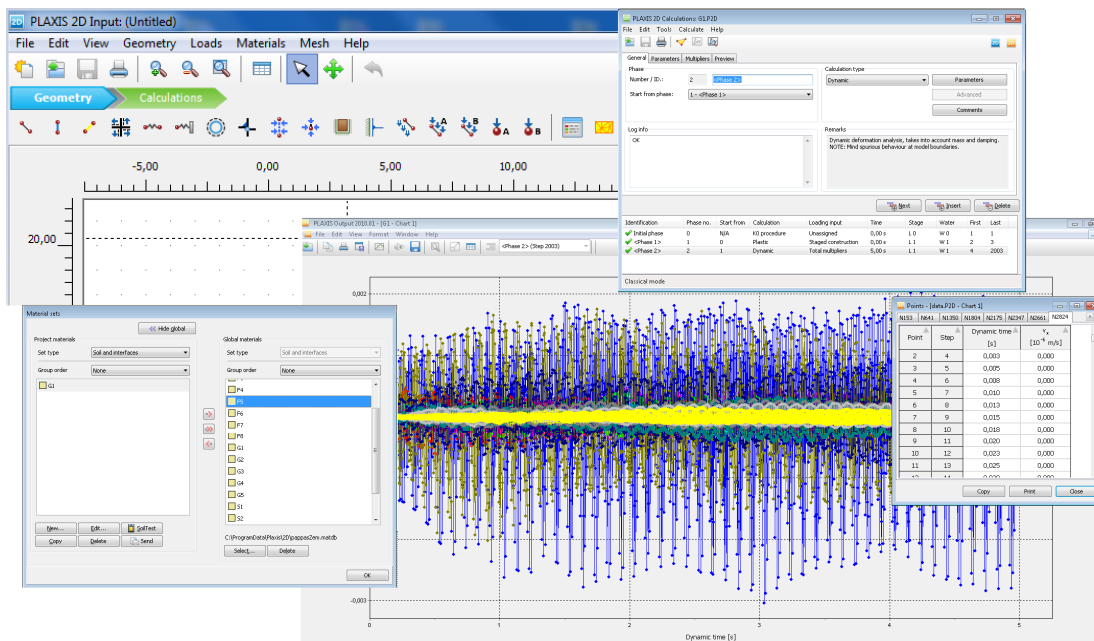
$F$	–	je síla [kN];
$m$	–	hmotnost tělesa [kg];
$a_g$	–	zrychlení [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ].

Základní rovnice pro výpočet časově závislých deformačních změn pod vlivem dynamického zatížení je pak definována pomocí maticového zápisu pro celou uvažovanou oblast podle vztahu (2).

$$a \cdot M + v \cdot C + u \cdot K = F \quad (2)$$

kde:

$M$	–	hmotnostní matice;
$u, v, a$	–	posun, rychlost a zrychlení v závislosti na čase;
$C$	–	matice tlumení;
$K$	–	matice tuhosti;
$F$	–	vektor zatížení.



Obr. 1: Ukázka výpočetního programu Plaxis

## 2.2 Vstupní parametry modelů – zeminy

Pro případ parametrických výpočtů je tedy vytvořeno 18 modelů s homogenním prostředím, pro které jsou fyzikální a mechanické vlastnosti určeny ze středních hodnot směrných normových charakteristik zemín (G1 – G5, S1 – S5 a F1 – F8) a uvedeny v Tab. 1-3. Výpočetní program Plaxis nedokáže počítat s nulovou hodnotou soudržnosti, proto je jako minimální hodnota soudržnosti pro 6 nesoudržných zemín (G1 – G3 a S1 – S3) zvolen 1 kPa. Podélná ( $V_p$ ) a příčná ( $V_s$ ) rychlost šíření seizmických vln jsou pro jednotlivé zeminy ve výpočetním programu stanoveny automaticky ze zadaných parametrů (přetvárných parametrů a objemové hmotnosti) pomocí rovnic (3) a (4). Materiálové parametry tlumení, jež se do výpočetního programu zadávají pomocí Rayleighových součinitelů tlumení, nejsou pro tyto modely uvažovány. Hladina podzemní vody se v modelu neuvažuje.

$$V_p = \sqrt{\frac{E_{oed}}{\rho}} \quad E_{oed} = \frac{E_{def}}{\beta} = \frac{E_{def} \cdot (1 - \nu)}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2 \cdot \nu)} \quad (3)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad G = \frac{E_{def}}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (4)$$

kde:

- $E_{oed}$  – Edometrický modul [MPa];
- $G$  – Smykový modul [MPa];
- $E_{def}$  – Deformační modul [MPa];
- $\rho$  – Objemová hmotnost prostředí [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ];
- $\nu$  – Poissonovo číslo [-].

Tab. 1: Fyzikální a mechanické vlastnosti jemnozrnných zemin

Zemina	Objemová tíha [kN.m <sup>-3</sup> ]	Poissonovo číslo [-]	Úhel vnitřního tření [°]	Soudržnost [kPa]	Deformační modul [kPa]
F1	19	0,35	29	14	17500
F2	19,5	0,35	27	16	14500
F3	18	0,35	26,5	18	9000
F4	18,5	0,35	24,5	20	7250
F5	20	0,4	21	18	10750
F6	21	0,4	19	18	10750
F7	21	0,4	17	14	10500
F8	20,5	0,42	15	12	8500

Tab. 2: Fyzikální a mechanické vlastnosti písčitých zemin

Zemina	Objemová tíha [kN.m <sup>-3</sup> ]	Poissonovo číslo [-]	Úhel vnitřního tření [°]	Soudržnost [kPa]	Deformační modul [kPa]
S1	20	0,28	38	(1)	65000
S2	18,5	0,28	34,5	(1)	32500
S3	17,5	0,3	30,5	(1)	18500
S4	18	0,3	29	5	10000
S5	18,5	0,35	27	8	8000

Tab. 3: Fyzikální a mechanické vlastnosti šterkových zemin

Zemina	Objemová tíha [kN.m <sup>-3</sup> ]	Poissonovo číslo [-]	Úhel vnitřního tření [°]	Soudržnost [kPa]	Deformační modul [kPa]
G1	21	0,2	40	(1)	375000
G2	20	0,2	37	(1)	175000
G3	19	0,25	34	(1)	90000
G4	19	0,3	32,5	4	70000
G5	19,5	0,3	30	6	50000

### 2.3 Vstupní parametry modelů - dynamické zatížení

Zatížení je v modelu zadáno obdobně jako článku [6], tedy jako spojitě dynamické zatížení působící na ocelovou desku o vlastní tíze zařízení. Zdrojem vibrací je reverzní vibrační deska VDR 22 (Obr. 2), která je součástí vybavení geotechnické laboratoře na VŠB - TUO. Parametry reverzní vibrační desky, které jsou potřebné pro zadání do modelu, vycházejí jak z charakteristik udávaných výrobcem [3], tak i z provedeného experimentálního měření na zkušebním standu v areálu FAST. Parametry zadané do modelu jsou uvedeny v Tab 4.



Obr. 2: Reverzní vibrační deska VDR 22 při experimentálním měření

Tab. 4: Parametry reverzní vibrační desky

Reverzní vibrační deska VDR 22		
Hmotnost	120	kg
Rozměry hutnicí desky	400 x 630	mm
Frekvence*	100 / 82	Hz
Odstředivá síla	22	kN

\* maximální frekvence uvedená výrobcem / frekvence dosažená při experimentálním měření

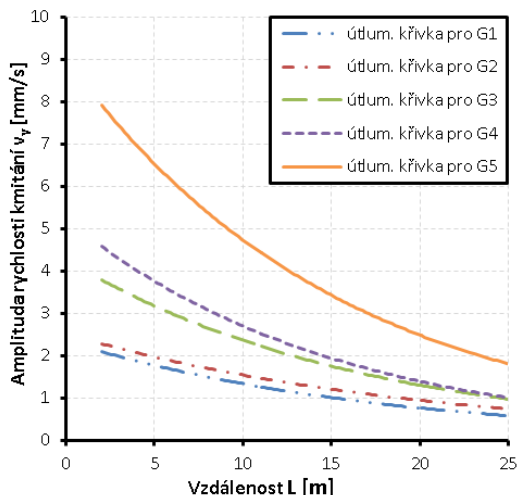
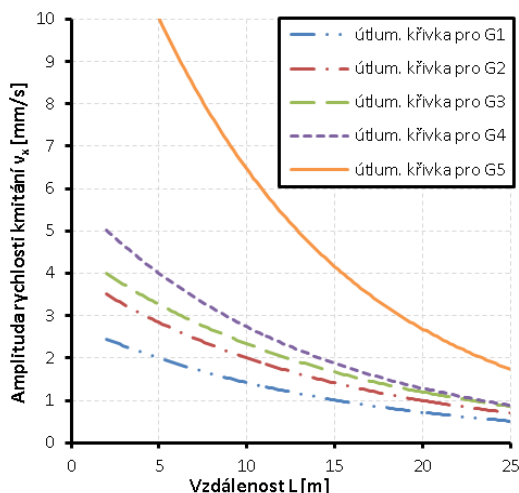
### 2.3 Vstupní parametry modelů - dynamické zatížení

V modelech jsou zadány mimo klasických geometrických okrajových podmínek, které omezují na hranici posuny v příslušném směru, také tzv. absorpční podmínky na spodní a pravé vertikální hranici. Těmito absorpčními podmínkami dosáhneme absorpci přírůstků napětí na hranicích modelu, které jsou způsobeny dynamickým zatížením a které by se jinak odrážely zpět do modelu. Primární napjatost je generována programovým systémem automaticky na základě vlastností uvažovaných zemin a hloubky. Dále je nutné správně zvolit velikost výpočetních časových kroků. To ovlivní nejen dobu výpočtu, ale i objem a přesnost samotných dat. Pro modely byl počet kroků zvolen na 2000. U výpočtu je též nutno stanovit dobu, po kterou bude dynamické zatížení působit. Tato doba má též vliv na dobu výpočtu a objem dat. Pokud budeme provádět měření ve větších vzdálenostech (desítkách metrů) je nutné přiměřeně prodloužit dobu, po kterou působí zatížení. Pro dané modely působí dynamické zatížení po dobu 5 sekund. Dále jsou v modelu určeny povrchové body, ve kterých byly vyhodnoceny výsledky výpočtu. V kalkulačním modulu je zvoleno 10 bodů (omezeno Plaxisem) ve vzdálenostech od místa vibrování cca 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 a 20 [m]. Tyto body mohou být případně doplněny ve výsledkovém modulu.

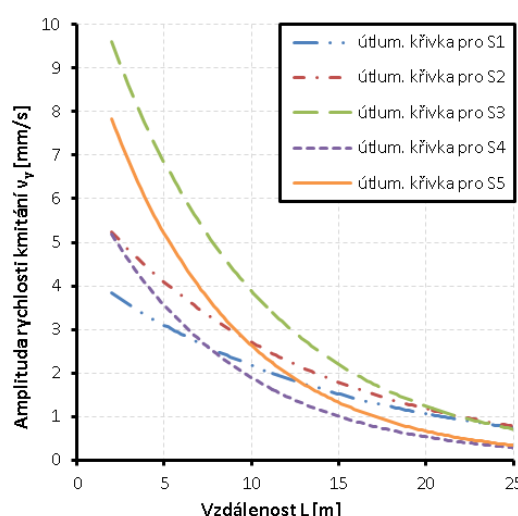
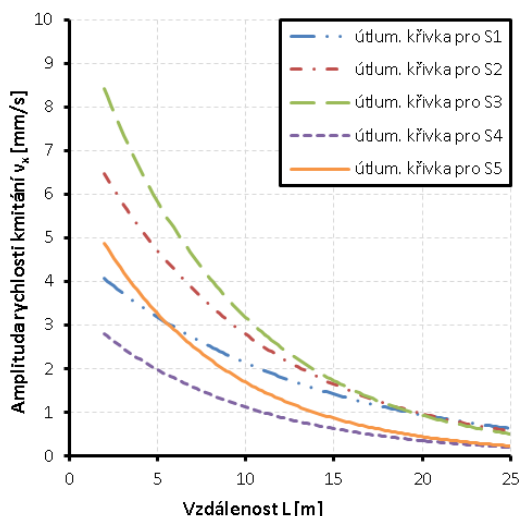
## 3 VÝSLEDKY

Výstupem z matematických modelů jsou vlnové záznamy v ose x a y pro zvolené povrchové body. Pomocí těchto vlnových záznamů jsou následně sestaveny křivky závislosti amplitudy rychlosti kmitání na vzdálenosti, též nazývané jako útlumové křivky (dále jen Ú.K.) [4]. Útlumové křivky z modelů jsou rozděleny do čtyř typů podle druhů zemin. Jedná se tedy o útlumové křivky

šterkovitých zemin (obr. 3 a 4), písčitých zemin (obr. 5 a 6), hlinitých zemin (obr. 7 a 8) a jílovitých zemin (obr. 9 a 10).



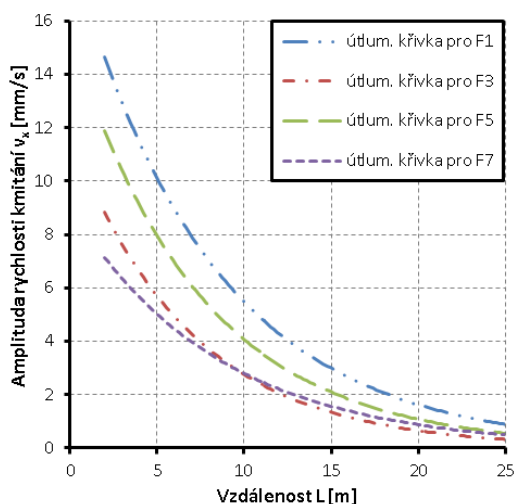
Obr. 3: Útlumové křivky šterkových zemin v ose x Obr. 4: Útlumové křivky šterkových zemin v ose y



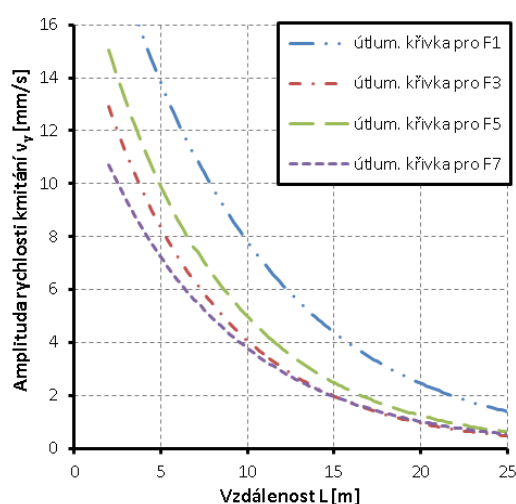
Obr. 5: Útlumové křivky písčitých zemin v ose x Obr. 6: Útlumové křivky písčitých zemin v ose y

U šterkových zemin dosahuje nejnižších amplitud rychlosti kmitání v obou směrech šterk dobře zrněný G1 – GW (viz. Obr. 3 a 4). Naopak nejvyšších hodnot dosahuje šterk jílovitý G5 – GC. Při pohledu na vlastnosti šterkových zemin v tab. 3 je patrné, že nejvýznamnější vliv bude mít především deformační modul zemin. Podobně ovlivňuje amplitudu rychlosti kmitání u písčitých zemin (obr. 5 a 6) také deformační modul, alespoň co se týče písků s nižším obsahem jemnozrnných zemin (S1 – S3). U písčitých zemin s vyšším obsahem jemnozrnných zemin (S4 a S5) se však výrazně projevují i ostatní vlastnosti. Možná i proto zde dosahuje nejnižších amplitud písek hlinitý S4 – SM.

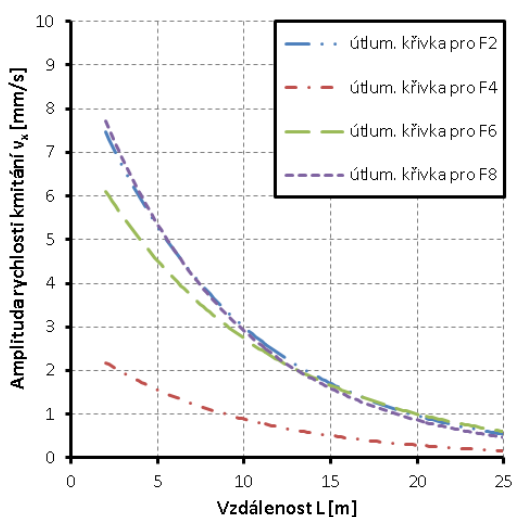
U hlinitých a jílovitých zemin, kde jsou rozdíly v deformačních modulech minimální, se tedy výrazně projevují ostatní vlastnosti. Ovšem z grafů (obr. 7 – 10) lze obtížně určit, které vlastnosti se projevují na útlumových křivkách a jak moc je ovlivňují. Můžeme ale pozorovat ze strmosti útlumových křivek, že jemnozrnné zeminy výrazněji utlumují amplitudu rychlosti kmitání s rostoucí vzdáleností nežli u písčitých a šterkovitých zemin.



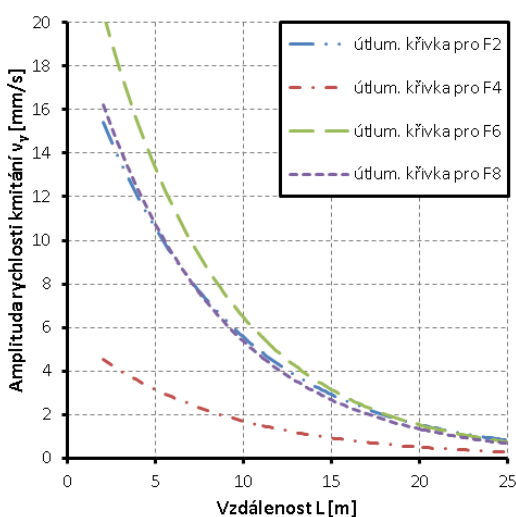
Obr. 7: Útlumové křivky hlinitých zemin v ose x



Obr. 8: Útlumové křivky hlinitých zemin v ose y



Obr.9: Útlumové křivky jílovitých zemin v ose x



Obr.10: Útlumové křivky jílovitých zemin v ose y

## 4 ZÁVĚR

Dynamický modul výpočetního programu Plaxis se ukázal jako vhodný prostředek pro realizaci parametrických studií závislosti účinků seizmického vlnění na vlastnostech zemin. Bylo zjištěno, že s rostoucí vzdáleností se vliv změny vlastností zeminy na amplitudu rychlosti kmitání snižuje. Z grafů je patrné, že nejlépe snáší dynamické zatížení šterkovité zeminy, a to především šterk dobře zněný (G1 – GW). Z toho lze předpokládat, že významný vliv na amplitudu rychlosti kmitání má deformační modul, který je u šterkových zemin větší nežli u písčitéch a jemnozrnných zemin. Při pohledu na jemnozrnné zeminy je pak patrné, že deformační modul nebude jediná vlastnost zemin ovlivňující amplitudu rychlosti kmitání. Pokud bychom uvažovali, že budeme mít prostředí s proměnnou jednou vlastností, v našem případě deformačním modulem, a využili rovnic pro výpočet rychlosti šíření (3) a (4) dalo by se konstatovat: „Čím větší deformační modul prostředí, tím vyšší rychlost šíření seizmického vlnění a nižší amplituda rychlosti kmitání“. Pro ověření především kvantitativních výsledků matematického modelování by bylo vhodné realizovat

experimentální monitorovací měření in-situ, která ovšem nebude snadné v celém rozsahu parametrické studie provést vzhledem k charakteru provedených parametrických výpočtů.

Cílem dalších parametrických studií bude zhodnotit vliv jednotlivých fyzikálních a mechanických vlastností zemin, jako je deformační modul zeminy, soudržnost, úhel vnitřního tření, a další. Vliv jednotlivých vlastností zemin na seizmické vlnění bude i součástí disertační práce Ing. Tomáše Petříka.

## PODĚKOVÁNÍ

Tento příspěvek byl zpracován v rámci řešení projektu SP2012/59 – Experimentální měření a modelová analýza odezvy vlivu technické seizmicity v horninovém prostředí.

## LITERATURA

- [1] ČAJKA, R., KŘIVÝ, V. a SEKANINA, D. Design and Development of a Testing Device for Experimental Measurements of Foundation Slabs on the Subsoil. *Transactions of the VŠB - Technical University of Ostrava: Construction Series* [online]. Warsaw: Versita, 2011, Volume XI, Number 1 / 2011, s. 1-5 [cit. 2012-09-13]. DOI: 10.2478/v10160-011-0002-2. Dostupné z: <http://www.versita.com>.
- [2] KREJSA, M. Probabilistic calculation of fatigue crack progression using fcprobcalc code. *Transactions of the VŠB - Technical University of Ostrava: Construction Series* [online]. Warsaw: Versita, 2012, Volume XII, Number 1 / 2012, s. 1-11 [cit. 2012-09-13]. DOI: 10.2478/v10160-012-0003-9. Dostupné z: <http://www.versita.com>.
- [3] NTC – Profesionální stavební technika. *NTC – Profesionální stavební technika* [online]. 2012 [cit. 2012-09-13]. Dostupné z: <http://www.ntc.cz>.
- [4] PETŘÍK, T. a STOLÁRIK, M. Numerické modelování dynamických účinků od vibrované piloty. *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava – Řada stavební*. 2010, roč. X, č. 2, s. 103-110. ISSN 1213-1962.
- [5] PETŘÍK, T., HRUBEŠOVÁ, E. a LEDNICKÁ, M. A comparison of numerical models results with in-situ measurement of ground vibrations caused by sheet pile driving. *Acta Geodynamica Et Geomaterialia*, 9(2), 2012, 165-171 [cit. 2012-09-13]. Dostupné z: [www.scopus.com](http://www.scopus.com).
- [6] PETŘÍK, T., LEDNICKÁ, M., KALÁB, Z. a HRUBEŠOVÁ, E. Analysis of Technical Seismicity in the Vicinity of Reconstructed Road. In: *Transactions of the VŠB - Technical University of Ostrava. Construction Series* [online]. Warsaw: Versita, 2012 [cit. 2012-09-13]. ISSN 1804-4824. DOI: 10.2478/v10160-012-0005-7. Dostupné z: <http://www.versita.com/>
- [7] PINKA, M., STOLÁRIK, M., FOJTÍK, R. a PETŘÍK, T. Experimental Seismic Measurement on the Testing Construction and The Analyze. *Transactions of the VŠB - Technical University of Ostrava: Construction Series* [online]. Warsaw: Versita, 2012, Volume XII, Number 1 / 2012, s. 1-11 [cit. 2012-09-13]. DOI: 10.2478/v10160-012-0006-6. Dostupné z: <http://www.versita.com>.
- [8] SARSBY, R. *Environmental Geotechnics*. Thomas Telford Limited, 2000, London.
- [9] STOLÁRIK, M. Modeling of vibration effect within small distances. *Acta Geodynamica Et Geomaterialia*, vol. 5, no. 2, 2008, 137-146. Dostupné z: [www.scopus.com](http://www.scopus.com).
- [10] TOWHATA, I. *Geotechnical earthquake engineering*. Springer Verlag- Berlin Heidelberg, 2008, Berlin, 684 pp.

## Oponentní posudek vypracoval:

Ing. Petr Hradil, Ph.D., Ústav stavební mechaniky, Fakulta stavební, VUT v Brně.

Doc. Ing. Marschalko Marian, Ph.D., Institut geologického inženýrství, HGF, VŠB-TU Ostrava.